

机械密封

第六版

〔西德〕E·迈尔 著

化学工业出版社

本书叙述机械密封的基本原理、设计原则、典型结构以及特殊结构；阐述影响机械密封性能的各种因素，并着重探讨机械密封的变形、摩擦状态与泄漏损失的关系，摩擦副的磨损与摩擦功率损失以及机械密封工作的可靠性问题；介绍摩擦副材料的选择依据和机械密封的试验方法与试验装置。

书中大量地介绍了机械密封的研究与试验成果。

本书供从事机械密封的研究试验、设计、制造和使用的工程技术人员阅读，也可供有关专业师生参考。

机 械 密 封

第 六 版

姚兆生 许仲枚 王俊德 译

*

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ 印张 $9^{3/4}$ 字数251千字印数1—9,800

1981年12月北京第1版1981年12月北京第1次印刷

统一书号15063·3346 定价1.20元

Dr.-Ing. Ehrhard Mayer

Axiale Gleitringdichtungen

Sechste, neubearbeitete und
erweiterte Auflage

© VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1977.

第六版前言

由于1978年1月1日起实行新法律规定的计量单位，特在此期间出版本书新修订的第六版。

本书除了对计量单位作了较大的修订以外，对机械密封的操作经验数值和施工图纸，也根据最新的技术水平作了相应的修改，并补充了一些文献资料。

近年来，全世界对操作安全、有利于环境保护和不用维修的密封元件，在技术和经济上越来越感兴趣，1977年，德意志联邦共和国的机械密封销售额已超过8,000万马克；而本书目前正准备出版俄文和匈牙利文译本第一版、法文译本第二版、英文译本第三版，这些事实充分说明了这一点。

艾哈德·迈尔

1977

译 序

密封元件虽然是机器上的非功能性零部件，但是其作用和对整台机器、整套装置，甚至整个工厂的影响都是很大的，特别是随着化工、石油、石油化工、动力、轻工、原子能等工业以及宇航技术的发展，它变得越益重要。为了在生产中杜绝“跑冒滴漏”，改进设备运转状况和操作条件，近二十年来，对密封技术进行了大量研究试验工作，发表了许多论文与报告，并出版了不少专门书籍。在专门讲述机械密封的书籍中，E·迈尔“机械密封”一书是一部比较好的专著，出版后受到世界密封技术界的重视与推崇。该书于1962年、1964年、1965年、1970年、1974年和1977年先后共印行了六版，并译成了七种文字（英文、法文、波兰文、意大利文、日文、俄文和匈牙利文），其中英文出版了三版，法文出版了两版。

此书是根据作者本人的大量试验研究成果和在设计、制造、使用经验的基础上写成的，主要介绍机械密封的基本原理，密封的流体力学与润滑、摩擦、磨损理论基础，设计方法，试验手段与设备，泄漏损失及其影响因素，摩擦与磨损的机理，摩擦功率损失，使用寿命和工作可靠性等问题。此外，还介绍了大量的实用结构。这本书对从事机械密封的设计、研究、制造与使用的工程技术人员很有参考价值。

在翻译本书时，遇到某些名词术语的定名问题，感到有必要在这里作一番交代。目前，我国在机械密封技术上普遍应用动环和静环这两个术语。动环一词表示随轴转动的环，静环则表示不转动的环。对大多数的机械密封来讲，弹簧力都作用在动环上，也就是说，摩擦副磨损了之后，由动环进行“补偿”。但是，由于特殊的使用要求，例如，轴的转速很高（每分钟几万转）、装设机

械密封的机组振动较大、简化密封结构等，必须将弹簧(波纹管)移到不旋转的环上。这样，在讲述机械密封的作用原理、设计方法、结构特征和标准图纸时，仍用“动环”和“静环”这两个名词就难于把问题说清楚。在本书中，作者使用“Gegenring”一词（直译为“对环”）表示磨损后不能起补偿作用的环，此环可能是不转动的，也可能是转动的。因此，既不能译成静环，也不能译成动环，译成“非补偿环”可能好一些。作者用“Gleitring”、“Dichtung”“Gleitringdichtung”等词表示可以做轴向运动的、磨损后完成补偿作用的环，同样，它既可能是旋转的，也可能是不旋转的，把这几个词译成动环或者静环也不合适，译成“补偿环”似乎妥贴一些。为了适应我国的习惯，我们将这些名词做如下处理，即根据密封环的性能与状态，分别采用“非补偿动环”、“非补偿静环”、“补偿动环”、“补偿静环”等译名。

关于书中的摩擦学名词，我们参考了中国机械工程学会摩擦学学会组织编译的“摩擦学英汉术语及定义”一书。

由于译者的水平有限，译文中难免会有错误和缺点，敬请读者指正。

译者

一九八〇年

常用公式和符号说明

a —— 密封的轴向磨损量	mm(毫米)
$b = \frac{D - d}{2}$ —— 密封环的有效密封宽度	mm(毫米)
C —— 槽的径向深度	mm(毫米)
C_p —— 比热	kJ/kgK (千焦尔/公斤 开尔文)
$d = 2r$ —— 有效密封面的内径	mm(毫米)
$d_m = 2r_m = \frac{D + d}{2}$ —— 密封面的平均直径	mm(毫米)
d_F —— 被密封介质的进入直径	mm(毫米)
d_H —— 水力直径	mm(毫米)
e —— 壁的径向厚度	mm(毫米)
f —— 摩擦系数	
h —— 粗糙深度中点间的距离 (粗糙深度构成的缝隙高度)	μm (微米)
h_0 —— 密封缝隙中润滑液膜的厚度	μm (微米)
$k = \frac{F_H}{F}$ —— 液力载荷系数	—
l —— 环的轴向厚度	mm(毫米)
$m = \frac{1}{\nu}$ —— 纵横应变比 (泊松比的倒数)	—
m_1 —— 质量流量	kg/h (公斤/时)
n —— 转速	r/min (转/分)
p_a —— 强度计算时的外压力	N/cm^2 (牛顿/厘米 ²)
p_i —— 强度计算时的内压力	N/cm^2 (牛顿/厘米 ²)
p_r —— 弹簧在密封面上造成的平均压力 (弹簧比压)	N/cm^2 (牛顿/厘米 ²)

p_a ——平均接触压力 (平均滑动压力或平均比压)

N/cm²(牛顿/厘米²)

p_{ap} ——密封缝隙中的平均压力 (端面反压、液膜推压力)

N/cm²(牛顿/厘米²)

p_z ——由于离心力在密封缝隙中造成径向压力的升高量 (增量)

N/cm²(牛顿/厘米²)

p_1 ——被密封介质的压力

bar(巴)

p_2 ——外介质的压力

bar(巴)

p_3 ——密封介质 (阻封介质) 的压力

bar(巴)

q ——常数

$\frac{1}{\text{mm}} \left(\frac{1}{\text{毫米}} \right)$

r ——密封环的内半径

mm(毫米)

r_a ——圆筒的外径

mm(毫米)

r_i ——圆筒的内径

mm(毫米)

$r_g = \frac{2}{3} \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \approx \frac{d_m}{2}$ ——滑动半径

mm(毫米)

$r_m = \frac{r_a + r_i}{2}$ ——圆筒的平均半径

mm(毫米)

r_p ——力臂

mm(毫米)

$s = \sum s_A + s_B$ ——密封缝隙的总变形量

μm (微米)

s_{Ma} ——由于轴向力造成的机械变形量

μm (微米)

s_{Mr} ——由于径向力造成的机械变形量

μm (微米)

s_{Ta} ——由于径向温度梯度造成的轴向热变形量

μm (微米)

s_{Tr} ——由于轴向温度梯度造成的径向热变形量

μm (微米)

t ——温度

°C

u ——流动速度

m/s (米/秒)

$v_g = \frac{\pi d_m n}{6000}$ ——平均滑动速度 (平均线速度)

m/s (米/秒)

$w = \frac{\pi \cdot d_E}{z}$ ——槽的间距

mm(毫米)

z ——流体动压润滑槽的数量

A ——密封环在单位运转时间内的轴向磨损量

$\mu\text{m/h}$ (微米/时)

B_1 ——材料的抗热应力开裂能力系数 (因子)	W/m (瓦/米)
B_2 ——密封结构上抗热应力开裂能力系数	—
C_a ——轴向温度梯度	K/mm (开尔文/毫米)
C_r ——径向温度梯度	K/mm (开尔文/毫米)
C_s ——辐照系数	W/m ² K ⁴ (瓦/米 ² 开尔文 ⁴)
C_F ——变形计算用形状系数	—
C_w ——散热系数	—
C_1 ——计算抗热应力开裂时用的形状系数	—
C_2 ——流动常数	cm/S ^{$\frac{3}{2}$} (厘米/秒 ^{$\frac{3}{2}$})
C_3 ——流动常数	—
$D=2R$ ——有效密封面的外径	mm (毫米)
D_p ——接合直径	mm (毫米)
D_w ——轴径	mm (毫米)
E ——弹性模量	N/mm ² (牛顿/毫米 ²)
F ——接触面的面积	cm ² (厘米 ²)
F_H ——液力载荷面积	cm ² (厘米 ²)
F_s ——辐照面积	m ² (米 ²)
F_w ——实际接触面积	cm ² (厘米 ²)
H ——硬度	—
$K=R_a/R_{max}$ ——微观表面的完整系数	—
L ——机械密封的使用寿命	h (小时)
$\overline{M}$ ——分布力矩 (线性力矩)	Nmm/mm (牛顿毫米/毫米)
M_F ——由于液体涡流造成的摩擦力矩	Nmm, Nm (牛顿毫米, 牛顿米)
M_G ——摩擦副表面摩擦造成的力矩	Nmm, Nm (牛顿毫米, 牛顿米)
$M_R=M_G+M_F$ ——密封的总摩擦力矩	Nmm, Nm (牛顿毫米, 牛顿米)
$N_R=M_R\omega$ ——密封耗费的功率	kW, W (千瓦, 瓦)
P ——分布力 (线性力)	N/cm (牛顿/厘米)
P_F ——弹簧力	N (牛顿)
P_G ——作用在摩擦副密封面上的压紧力 (轴向密封力)	N (牛顿)

P_H ——液体载荷力	N(牛顿)
P_R ——辅助密封件的摩擦力	N(牛顿)
P_{Sp} ——密封缝隙中压力造成的力(缝隙中总力;端面反力)	N(牛顿)
Q ——泄漏量(泄漏损失)	
	$\text{cm}^3/\text{s}, \text{cm}^3/\text{min}, \text{cm}^3/\text{h}$ (厘米 ³ /秒,厘米 ³ /分,厘米 ³ /时)
R_a ——微观表面不平深度(粗糙深度)的算术平均值	μm (微米)
$R_{\max}$ ——微观表面不平的最大深度	μm (微米)
S ——缝隙系数	$\text{N}/\text{cm}^2\text{s}$ (牛顿/厘米 ² 秒)
S_B ——断裂安全系数	
T ——绝对温度	K(开尔文)
T_K ——冷却介质的温度	K(开尔文)
ΔT ——由于热应力开裂而造成损坏时的温差	K(开尔文)
$\Delta T_{\min}$ ——摩擦副中 ΔT 的最小值	K(开尔文)
W ——摩擦副缝隙中产生的热量	kW(千瓦)
W_A ——通过环A散出的热量	kW(千瓦)
W_B ——通过环B散出的热量	kW(千瓦)
α ——线热膨胀系数	K^{-1} (开尔文 ⁻¹)
β ——计算 λ 时的温度系数	—
ρ ——密度	kg/m^3 (公斤/米 ³)
δ ——迫装与热装时的直径过盈量	$\text{mm}, \mu\text{m}$ (毫米,微米)
$\omega = \frac{\pi n}{30}$ ——角速度	s^{-1} (秒 ⁻¹)
ε ——纵向变形(伸长)量(延伸率)	—
η ——动力粘度	$\text{Pa}\cdot\text{s}$ (帕斯卡·秒)
λ_0 ——0℃时的导热系数	W/mK (瓦/米开尔文)
$\lambda = \lambda_0(1 + \beta t)$ ——导热系数	W/mK (瓦/米开尔文)
ν ——泊松系数	—
ν_1 ——运动粘度	m^2/s (米 ² /秒)
σ_{bB} ——抗弯强度极限	N/mm^2 (牛顿/毫米 ²)

σ_b ——抗压强度极限

N/mm²(牛顿/毫米²)

σ_z ——抗拉强度极限

N/mm²(牛顿/毫米²)

A/B——摩擦副：A——旋转的；B——不旋转的（A和B单独出现时也代表这种意思）

Ha——铬镍钢上有抗磨层

GG——灰口铁

Ko——浸渍合成树脂的碳

Pre——填充酚醛树脂的石墨压制件

RG——铸造锡锌青铜

代 号	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Nb	Si	Ti
4541 X10Cr-Ni-Ti18.09	≤0.08	17~19	9~12	—	2	—	1	≥0.4
4550 X10Cr-Ni-Nb18.09	≤0.10	17~19	9~11.5	—	2	—	1	—
4582 X4Cr-Ni-Mo-Nb 25.07	≤0.06	25	7	1.5	≤2	≥0.48	≤1	—
6900 X12Cr-Ni18.09	≤0.12	17~19	8~10	—	2	—	1	—
6903 X10Cr-Ni-Ti18.10	≤0.08	17~19	9~12	—	2	—	1	≥0.4

目 录

常用公式和符号说明

第一章 绪论	1
第一节 密封的类型.....	1
第二节 机械密封的应用范围.....	1
第二章 机械密封的基本原理	9
第一节 结构、工作原理和力.....	10
第二节 密封参数.....	13
第三节 机械密封按布置、载荷和结构分类.....	14
第四节 辅助密封圈（径向密封件）.....	20
第五节 非补偿静环的结构和装设方法.....	25
第六节 密封环的迫装和热装.....	27
第七节 壁厚的计算.....	30
第三章 机械密封的试验装置	34
第一节 磨损试验装置.....	34
第二节 扭矩试验装置.....	34
第三节 超高压机械密封的试验装置.....	36
第四节 搅拌器用机械密封的试验装置.....	37
第五节 高速机械密封的试验装置.....	38
第四章 泄漏损失	41
第一节 关于泄漏问题的早期研究情况.....	41
第二节 工艺上可能达到的密封缝隙.....	42
第三节 密封缝隙的机械变形.....	44
一、轴向力对密封缝隙变形的影响.....	44
二、径向力对密封缝隙变形的影响.....	49
第四节 密封缝隙的热变形.....	52
一、轴向温度梯度的影响.....	52

二、径向温度梯度的影响	53
第五节 各种变形的叠加	54
第六节 密封缝隙变形对泄漏损失的影响	58
第七节 表面粗糙度的影响	61
第八节 摩擦面间密封缝隙压力和接触压力 (密封面上的比压)	64
第九节 计算的可能性与实测结果	71
一、边界摩擦状态下的泄漏损失	71
二、混合摩擦状态下的泄漏损失	84
三、液体摩擦状态下的泄漏损失	87
1. 流体动压式机械密封	88
2. 具有弧形循环槽的热流体动压式机械密封	95
第十节 通过其它不密封通路的泄漏损失	99
第五章 摩擦副的磨损	101
第一节 摩擦副的材料	101
一、塑料	102
二、人造碳和石墨	103
三、金属	114
四、金属氧化物	116
五、金属碳化物 (硬质合金)	117
第二节 摩擦副材料的选配	118
第三节 抗磨强度 (耐磨性)	120
一、摩擦状态的影响	121
二、接触压力 (比压) 的影响	123
三、滑动速度 (线速度) 的影响	126
四、对摩擦材料的影响	127
五、温度的影响	128
六、介质润滑性能的影响	129
七、介质中固体物质的影响	132
八、表面粗糙度的影响	133

九、振动的影响	135
第四节 冲刷磨损	136
第五节 热应力破裂	137
一、单一材料的评定	138
二、密封结构的评定	139
第六节 化学腐蚀引起的磨损	142
第七节 机械密封寿命的预测	142
第六章 摩擦损失	147
第一节 端面间的摩擦	147
一、摩擦状态和摩擦系数	148
1. 液体摩擦	148
2. 混合摩擦	149
3. 边界摩擦	151
4. 工程干摩擦	158
5. 真空摩擦和低温摩擦	160
第二节 密封环的温度	161
一、单一材料制成的密封环	162
二、用多层材料制成的密封环	163
三、温度梯度	165
四、散热系数	166
第三节 由于密封腔中液体涡流引起的功率消耗	170
一、轴旋转	170
二、外壳旋转	172
第七章 泄漏损失、寿命和摩擦状态之间的关系	174
第八章 机械密封工作的可靠性	177
第一节 密封缝隙的张大（密封面的脱离）	177
一、平衡型机械密封上密封缝隙的张大	177
二、非平衡型机械密封上密封缝隙的张大	179
三、流体动压式和流体静压式机械密封上 密封缝隙的张大	179

第二节	不允许的温升	180
第三节	断裂的危险	181
第四节	防止动环和静环扭转的方法	182
第五节	辅助保护设备	183
第九章	特殊结构	186
第一节	搅拌器用的机械密封	186
第二节	超高压机械密封	198
第三节	高速机械密封	200
第四节	高温机械密封	204
第五节	低温机械密封	206
第六节	含有磨料介质用的机械密封	208
一、	密封含有砂粒和固体物质的液体	208
二、	密封含有盐和结晶物质的液体	212
三、	密封含有各种纤维和粪便的液体	215
四、	密封溶液和悬浮液	216
第七节	火力发电厂设备上用的机械密封	219
一、	锅炉给水泵用机械密封	222
二、	冷凝泵用机械密封	233
三、	热水泵和拉蒙特(La-Mont)型泵用机械密封	235
四、	发电机用机械密封	240
五、	附件和辅助设备	242
第八节	原子能发电厂设备上用的机械密封	250
一、	一次回路设备上用的机械密封	251
1.	压水反应堆主循环泵用的机械密封	252
2.	沸水反应堆主循环泵用的机械密封	259
3.	特殊反应堆中设备上用的机械密封	262
二、	辅助泵和安全泵用的机械密封	270
参考文献		275
厂家索引		295

第一章 绪 论

密封的作用是将压力、工作介质和温度不同的各个空间隔开。此外，它还有其它的用途，例如，防止外来杂物进入工作介质中去，或者阻挡润滑剂从机壳中向外流出。

第一节 密封的类型

工业上使用大量的密封来解决繁多而要求又各不相同的漏泄问题。按照使用条件和技术要求，可以把各种密封的应用场合列举如下：密封垫片、O形圈和焊接金属环做为机器或设备静止联接的密封；软填料、各种形状的弹性密封圈、活塞环、金属填料、金属套筒和膜片则用来密封往复运动的机件；密封旋转轴时，可以选用迷宫密封、防护密封、填料密封、套筒、不同形状的弹性密封圈、径向密封圈、螺旋沟密封以及使用不同材料制造的轴向机械密封和径向机械密封。

第二节 机械密封的应用范围

根据结构原理，可以把机械密封分成轴向的和径向的两大类*。图1示出了一种轴向机械密封。轴向方向的作用力，对可能从密封缝隙径向方向出来的漏泄液流产生很大的影响。对于图2所示的径向机械密封来讲，主要的不密封通路位于轴、轴套以及密封环之间，也就是说，漏泄液流是沿着轴向方向流出来的。由于机械密封具有漏泄量极少、工作可靠性程度高和寿命长等许多优点，所以在旋转轴上它越来越多地代替以前占优势的填料密封。机械密封的作用是在静止的和旋转的环形平面之间构成和维

* 后文中将轴向机械密封简称为机械密封。——译者

持弹性的密封接合。它同时兼有密封、支承和换热等多种作用。

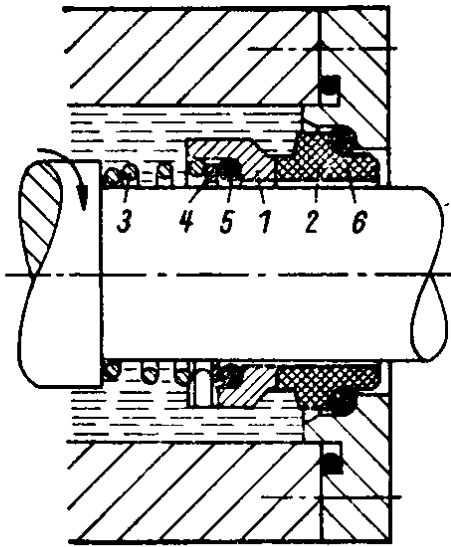


图 1 轴向机械密封〔2*〕①

1—补偿动环；2—非补偿静环；3—压缩弹簧；4—托环；5—补偿动环的辅助密封圈；6—非补偿静环的辅助密封圈

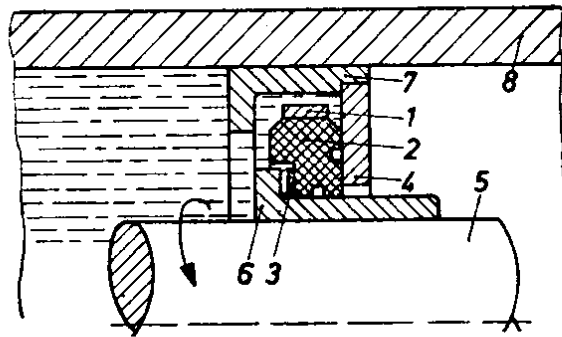


图 2 径向机械密封

1—金属箍；2—石墨补偿动环；3—环形状波状弹簧；4—固紧的非补偿静环；5—透平机轴；6—转动轴套；7—密封壳；8—透平机壳

大约于本世纪初，在机器制造业中，首次出现简单的端面密封，用以解决困难的密封问题，同惯用的软填料或者填料密封装置相比，无论在功能上或者构成原理上，都有所改进。图3a示出了最简单的端面密封（机械密封）结构。轴上的凸肩直接和机壳上的凸出平面贴合转动而形成密封作用。然而由于当时缺乏合适的材料和加工机床，尽管这种密封结构有很多优点，还是没有能够发挥其效用。直到本世纪二十年代，机械密封才开始在许多冷冻装置上得到较多的使用。后来出现了所谓的橡胶弹性V形密封圈(图3b)，其工作原理和上面的那种简单的机械密封相似，它适用于表1中第I组的工作范围。因为它的材料具有弹性，所以这种密封能很好地适应由于热力上的和机械上的原因而造成的轴向移动。在汽车工业中也很早就认识到这种能自调的、使用可靠的

① 方括号内带星号的数字表示制造厂家索引部分的序号。——译者